

CARACTERIZACIÓN HIDROLOGICA DE LA CUENCA DEL RIO CHICAMOCHA EN COLOMBIA, CON EL PROGRAMA HYDRO-BID.

HYDROLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE CHICAMOCHA RIVER BASIN IN COLOMBIA, WITH THE HYDRO-BID PROGRAM.

MÁSTER UNIVERSITARIO EN HIDROLOGÍA Y GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS

Presentado por:

D./D^a PAULA VANESSA RINCON LARA

Dirigido por:

Dr./Dra. D./D^a JUAN ANTONIO PASCUAL AGUILAR

Alcalá de Henares, a 3 de junio de 2019

AGRADECIMIENTOS

Esta aventura nunca hubiera sido posible sin la ayuda de mi mamá, una mujer que con sus palabras me calma en momentos difíciles, me alienta a superarme y celebra cada uno de mis logros, gracias mam.

A mi papá quien durante toda mi vida me ha enseñado a nunca abandonar un partido por más mal que lo lleve, que gran lección aprendí jugando y divirtiéndome a tu lado, definitivamente junto a ti el partido de la vida es maravilloso.

A mi hermana quien decidió formar parte también de esta aventura, que nos ha hecho fortalecer nuestro vínculo.

A las personas más importantes de mi vida y a los cuales siempre quiero llevar buenas noticias, mis abuelitos, solo puedo decir que son mi pilar, mis mejores consejeros, alcahuetes y los cuales tienen la palabra perfecta en el momento indicado, solo puedo decir que tengo el mejor papel que protagonizar, ser su nieta y amiga, los amo con mi alma.

A toda mi familia que ha hecho de este recorrido un hecho y se ha preocupado por mi hermana y por mí, durante todo este tiempo.

A mi tutor quien me dio herramientas de partida útiles para lograr este trabajo.

Finalmente, a mis amigos que me apoyaron con información, fueron a las instituciones, hicieron cartas y todo lo hubo al alcance de ellos para la reunión de los datos, gracias especiales a Yeny Carrillo, a mis compañeros de Master, Deysi gran compañera de vida quien se aguanta mis habladurías de eternas horas en el cuarto, Marcelo quien me apoyó durante todo el recorrido de Hydro-BID y me ayudo en momentos de confusión, a las chicas de la casa que hicieron de este espacio una familia.

A todos gracias.

“Había perdido en la espera la fuerza de los muslos, la dureza de los senos, el hábito de la ternura, pero conservaba intacta la locura del corazón” Gabriel García Márquez, Cien Años de Soledad, 1968.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1 Objetivo General.....	2
2.2 Objetivo Especifico	2
3.JUSTIFICACIÓN	3
3.1 Área de Estudio.....	3
3.2 Demanda y Oferta de Agua en el Rio Chicamocha	5
4. MARCO LEGAL	7
5. MARCO TEÓRICO	10
5.1 Cambio Climático	10
5.2 Ciclo Hidrológico y Balance Hídrico.....	14
6. METODOLOGÍA	20
6.1 Obtención de Información	20
6.2 Calibración	24
6.3 Análisis Cambio Climático.....	25
7. RESULTADOS.....	26
7.1 Modelo Base.....	26
7.2 Comparación de los diferentes escenarios de cambio climático con la simulación base. 29	
8. CONCLUSIONES.....	35
9. DISCUSIÓN	36
10.RECOMENDACIONES.....	37
11.BIBLIOGRAFIA	38

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Ubicación Cundinamarca y Boyacá en Colombia	4
Figura 2. Representación del ciclo hidrológico.....	14
Figura 3. Funcionamiento de Hydrobid	17
Figura 4. Área de estudio por medio de la herramienta AHD.....	21
Figura 5: Regresión lineal entre el modelo simulado y el modelo observado.....	23
Figura 6. Comportamiento de caudales modelados y observados, frente a la precipitación	23
Figura 7. Resultado de la calibración realizada.....	24
Figura 8. Escenario Base.	27
Figura 9. Escenario base comportamiento del caudal observado respecto a la temperatura.	27
Figura 10. Comportamiento de la precipitación, escenario base.....	28
Figura 11. Comportamiento de la infiltración en escenario base	28
Figura 12. Precipitación diferentes escenarios	30
Figura 13. Evapotranspiración bajo diferentes escenarios	31
Figura 14. Escorrentía bajo diferentes escenarios	31
Figura 15. Infiltración bajo diferentes escenarios	32
Figura 16. Caudal en diferentes escenarios	32
Figura 17. Diferentes escenarios con respecto al caudal observado y la temperatura	33
Figura 18. Temperatura y precipitación bajo diferentes escenarios	33
Figura 19. Escorrentía y precipitación bajo los diferentes escenarios.....	34

INDICE TABLA

Tabla 1: Categoría e interpretación del índice de escasez de la cuenca alta del Río Chicamocha, tomado de PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO AMBIENTAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA, 2006.	6
Tabla 2: Localización de Estaciones de caudales, información recopilada de IDEAM.....	20
Tabla 3: Estadística para la verificación de la calibración, datos proporcionados por el programa Hydro-BID.	22
Tabla 4: estadística después de realizar calibración, datos proporcionados por el programa Hydro-BID.....	24
Tabla 5: Balance Hídrico Escenario Base, proporcionado por el programa Hydro-BID ...	26
Tabla 6: Balance Hídrico Escenario Base, proporcionado por el programa Hydro-BID ...	29
Tabla 7: Balance Hídrico Escenario A, proporcionado por el programa Hydro-BID.....	29
Tabla 8: Balance Hídrico Escenario B, proporcionado por el programa Hydro-BID	29
Tabla 9: Balance Hídrico Escenario C, proporcionado por el programa Hydro-BID	29

TABLA DE ABREVIATURAS

CAR: Corporación Autónoma de Cundinamarca

CORPOBOYACA: Corporación Autónoma de Boyacá

COMID: Código único de identificación

PIB: Producto Interno Bruto

BID: Banco Interamericano de Desarrollo

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorológico y Estudios Ambientales

PRECIS: Proporcionar Climas Regionales para Estudios de Impactos

POMCA: Planes de Ordenamiento de las Cuencas Hidrográficas

HMS: Modelo de Sistema Hidrológico

GIS: Sistema de Información Geográfica

LAC: Latino América y el Caribe

P: precipitación

ETP: evapotranspiración

Q: caudal de salida

AHD: Datos de Hidrología Analítica

GWLF: Factor de Carga de Flujos Generalizados

°C: Grados Centígrados

QGIS: Quatum Sistema de Información Geográfica

Mm³: Millones de metros cúbicos

OMM: Organización Meteorológica Mundial

PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente

IPCC: Plan Intergubernamental del Cambio Climático

RESUMEN

La caracterización de la cuenca Alta del Río Chicamocha, bajo escenarios de cambio climático se puede realizar por medio de diferentes plataformas, la escogida para este estudio es Hydro-BID que proporciona una herramienta que con base en los datos recogidos a través de instrumentos especializados permite visualizar las proyecciones que se deseen establecer dando a conocer datos que tienen que ver con temperatura, precipitación, escorrentía y evapotranspiración en la cuenca del mismo río.

Se plantearon tres escenarios para el año 2040, el primero un aumento de temperatura y precipitación, el segundo un aumento de temperatura sin alterar la precipitación y el tercero un aumento de la temperatura con disminución de la precipitación, dando como resultado que el aumento de la temperatura impulsa la precipitación, la escorrentía y la evapotranspiración, viéndose afectada la cuenca a nivel de caudal entre 2 y 5 millones de metros cúbicos.

Se puede establecer que la herramienta es muy útil, aunque para que los resultados dados puedan generar mayor confiabilidad, es necesario la recolección de un mayor número de información, que atiendan a las exigencias de la plataforma.

Palabras clave: cambio climático, Hydro-BID, Cuenca Chicamocha, simulación.

ABSTRACT

The characterization of the Upper Chicamocha river basin, under scenarios of climate change can be done through different platforms, the one chosen for this study is Hydro-BID, which provides a tool based on the data collected through specialized instruments , allows to visualize the projections that we wish to establish by disclosing data that have to do with temperature, precipitation, runoff and evapotranspiration in the basin of the same river.

Three scenarios were proposed for the year 2040, the first one an increase in temperature and precipitation, the second an increase in temperature without altering the precipitation and the third an increase in temperature with a decrease in precipitation, as a result of which the increase in temperature promotes precipitation, runoff and evapotranspiration, affecting the basin at the level of flow between 2 and 5 million cubic meters

It can be established that the tool is very useful, although for the given results to generate greater reliability, it is necessary to collect a greater number of information that meets the demands of the platform.

Key words: Climate change, Hydro-BID, Chicamocha river basin, simulation.

1. INTRODUCCIÓN

La crisis del agua es un problema global y no se centra únicamente en su disponibilidad, ésta involucra tres aspectos: distribución, accesibilidad y calidad; la distribución porque existen regiones muy húmedas y otras muy secas; la accesibilidad ya que existen comunidades que no poseen acceso al recurso y la calidad que ahora enfrenta la dualidad de para qué situaciones es necesaria y medible. (Berestovoy, 2018).

El cambio climático ha hecho que todos los países dirijan sus esfuerzos al desarrollo de alternativas para afrontar los retos a los cuales estarán expuestos y por lo tanto a la capacidad de adaptación y la reducción a la vulnerabilidad.

En Colombia, el panorama no es diferente, según el Departamento Nacional de Planeación en el caso de no implementar medidas para lograr esa adaptación, puede llegar a causar pérdidas económicas de promedio anual del Producto Interno Bruto (PIB) de 0,5% durante los años 2011-2100, las cuales equivalen a 3,8 billones de pesos por año. “Si Colombia no se adapta al cambio climático perderá \$3,8 billones anuales hasta el 2100” (www.dnp.gov.co)

Debido a esto, es de vital importancia tener claro el comportamiento del cambio climático y como podría afectar a la zona en razón de explicar cómo es el dinamismo de la capacidad del recurso agua, dirigiéndolos de forma directa a los modelos hidrológicos con el fin de entender y confrontar dichos episodios.

Los modelos hidrológicos son unas de las opciones que se han tomado como fuente de información de primera mano, brindando una percepción de la alteración climática global, por medio de componentes específicos o en conjunto dando una idea clara del comportamiento del espacio territorial a estudiar. Hydro-BID como herramienta de modelación hidrológica, útil para América Latina y El Caribe, permite aclarar el comportamiento del agua y el clima. Los resultados obtenidos de esta herramienta pueden ser utilizados como soporte para la planificación de recursos hídricos por medio del balance de la oferta de agua con la demanda de esta. (Berestovoy, 2018).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Simular bajo condiciones de cambio climático escenarios de sequias e inundaciones por medio de la plataforma Hydro-BID.

2.2 Objetivo Especifico

Describir el funcionamiento de hydro-BID.

Evaluar el comportamiento de la cuenca del rio Chicamocha, con base a los escenarios de cambio climático.

Establecer a nivel de importancia, los diferentes escenarios de cambio climático establecidos bajo su severidad.

Determinar la importancia de la herramienta de Hydro-BID frente a los cambios climáticos que la cuenca alta del rio Chicamocha enfrenta.

3. JUSTIFICACIÓN

El motivo para desarrollar este estudio se basa en la falta de herramientas accesibles que puedan ayudar a mejorar la planificación territorial en cada una de las cuencas Colombianas; las inundaciones o las sequías no son noticia si no hay poblaciones afectadas o si no se producen desastres y es en este momento, cuando los entes gubernamentales ofrecen ayudas y reponen a las víctimas, reflejando una necesidad absoluta del entendimiento del comportamiento del recurso hídrico superficial y cómo un acto de planificación con respecto a futuros hechos donde se pueden evitar pérdidas en cosechas, ganados, infraestructuras, poblaciones, entre otros; modelar el comportamiento del cambio climático por medio de la herramienta Hidro-BID, permitirá dar un ápice de luz a las poblaciones involucradas, *“siendo un instrumento de control, monitoreo y planificación”* (Santos et al., 2017).

3.1 Área de Estudio

Colombia se encuentra ubicada al Noroccidente de América del Sur (Figura 1), limitando al Norte con Panamá y el Océano Atlántico, al Sur con Perú y Ecuador, al oriente con Venezuela y Brasil y al Occidente limita con el Océano Pacífico, éste es un lugar estratégico, ya que se encuentra cercano a la línea del Ecuador con un clima característico del trópico, el cual no se ve afectado por el cambio de las estaciones, y se caracteriza por un comportamiento climático monomodal, bimodal y de lluvias continuadas. (Jaramillo y Chaves, 2000)

La cuenca alta del Rio Chicamocha se encuentra ubicada en el centro del país, formada en medio de un altiplano, llamado altiplano Cundiboyacense, hace parte de la jurisdicción de la corporación autónoma de Boyacá, CORPOBOYACA. El rio Chicamocha nace a la altura del municipio de Tuta, atraviesa por los Municipios de Paipa, Duitama, Nobsa, Sogamoso, Belencito, Topaga, Corrales, Beteitiva, Tasco, finalizando a la altura de Paz del Rio, se caracteriza por tener pendientes poco pronunciadas (Rincón y Camargo, 2017).

La precipitación en el área Cundiboyacense es bastante diferente y variable, ésta no alcanza los 1.000 milímetros anuales; pero en sus cercanías las precipitaciones son diversas, principalmente en la Sabana de Bogotá donde su precipitación es mayor alrededor de 1500 milímetros, y al sur occidente descienden a los 1000 milímetros, al occidente del altiplano alcanzan 2500 milímetros y en la cercanía de Santander

departamento vecino en sentido nororiental, alcanza una medida anual entre 1500 milímetros y 2000 milímetros (Caicedo, Ramírez y Gómez, 2001).



Figura 1: Ubicación Cundinamarca y Boyacá en Colombia

A pesar que el altiplano tiene este tipo de características, se describe como un espacio árido por la vegetación existente y por las relativas bajas precipitaciones que tiene un promedio de 800 milímetros anuales, aunque como ya antes se menciona a sus alrededores tiene valores de precipitación mucho más importantes, con una presión atmosférica menor, permitiendo niveles de radiación altos, con temperaturas relativamente bajas respecto al promedio de temperatura nacional, no tienen grandes variaciones durante todo el año pero si está bien diferenciado entre el día y la noche (CORPOBOYACA et al., 2006) las vitales fuentes de humedad de esta zona son de los vientos alisios que provienen del oriente del

país que vienen acompañados de humedad y frío según la ley de Buys Ballot (Roth, Günter D, 1979)

El altiplano cundiboyacense es un paisaje geomorfológico, que se encuentra entre dos cordilleras, la oriental y la central, las cuales están formados normalmente por materiales sedimentarios, (Zinck, 2012) a una altura entre los 2300 y 2900 metros sobre el nivel del mar, tiene como peculiaridades geológicas que está formado en la era terciaria con característica lacustre, con suelos ricos y tierras en su mayoría fértiles para los cultivos principalmente de papa y cebolla, además de una evidente presencia de ganadería siendo estos transcendental fuente económica del área. (Martínez Peláez et al., 2005)

Los principales elementos de las zonas áridas son el “*régimen hídrico y el eólico*” ya que éstos dispondrán la vegetación que podrá existir en este tipo de ecosistema, siendo elementos restrictivos para la existencia de las especies vegetales. Es característico de los ecosistemas secos que se lleven a cabo actividades económicas como la ganadería y el pastoreo, así como la agricultura intensiva, trayendo como consecuencias pérdida de la cobertura vegetal creando erosión en el suelo, compactación y cambio en el mismo (Valencia, Duarte, Ortiz, y Ríos, 2012).

3.2 Demanda y Oferta de Agua en el Rio Chicamocha

El Rio Chicamocha es alimentado por 6 cauces, según la descripción hidrológica del Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la cuenca alta del Rio Chicamocha las cuales caracterizan a nivel hidrológico la cuenca, donde el régimen de caudales tiene un comportamiento bimodal y no disminuyen en épocas de sequía deduciendo que están siendo beneficiados por aportes de agua subterránea, de acuíferos de porosidad primaria “*que pueden constituir acuíferos de mediana a buena productividad*”. (CORPOBOYACA et al., 2006)

Ya que todos estos estudios se realizaron de manera teórica por falta de información, el Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la Cuenca Alta del Rio Chicamocha hace énfasis que no se tiene un control real de los caudales, debido a que este territorio es netamente rural y que la mayoría de las captaciones se hacen de manera directa y no se posee un control de usuarios, ni de volúmenes de demanda y tampoco hay permisos de captación de agua. (CORPOBOYACA et al., 2006)

El caudal mínimo ecológico con base a la resolución 865 de 2004 fue determinado a nivel general como el 25% del caudal medio mensual multianual más bajo de la corriente de estudio, adicionalmente de un 25% por la reducción de calidad del agua, esto es debido a que en la mayoría de los cauces de Colombia se vierte directamente materia orgánica, residuos industriales y agrícolas, dando un total de protección al caudal de 50%. (CORPOBOYACA et al., 2006)

Las demandas fueron calculadas por medio de un trabajo de campo de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá con el fin de tener un acercamiento a la economía del sector y como podría estar afectando a los cauces. Es importante tener en cuenta que se debe contar con un caudal mínimo ecológico, con una aportación significativa, lo cual en el estudio de cambio climático puede estar viéndose afectado, teniendo como demandas de agua por la cuenca alta del río Chicamocha un total de $4,5 \cdot 10^{11}$ millones de metros cúbicos al año. (CORPOBOYACA et al., 2006)

Tabla 1: Categoría e interpretación del índice de escasez de la cuenca alta del Río Chicamocha, tomado de PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO AMBIENTAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA, 2006.

Categoría	Rango	Explicación
Alto	>50%	Demanda alta
Medio alto	21-50%	Demanda apreciable
Medio	11-20%	Demanda baja
Mínimo	1-10%	Demanda muy baja
No significativo	<1%	Demanda no significativa

Según esta categoría se puede interpretar que el Río Chicamocha se encuentran con una demanda baja sin ser afectando el caudal mínimo ecológico. (CORPOBOYACA et al., 2006)

4. MARCO LEGAL

La Constitución Política de Colombia tiene como principios fundamentales en su Artículo 79, que todos tenemos derecho a un “*ambiente sano*”, garantizando la participación ciudadana en la toma de decisiones, como también es un deber de la nación la protección de la “*diversidad e integridad del ambiente*”.(Constitución Política de Colombia, 1991). Siendo así, el estado debe proteger y planificar los recursos hídricos del país, por lo tanto, se generan políticas con el objetivo de cumplir con la directriz.

La Política Nacional de la Gestión Integral del Recurso Hídrico, en el cual se desarrollan ocho principios donde se han definido estrategias para el cumplimiento de estos, es la “*Hoja de ruta para la incorporación de la gestión integrada del recurso hídrico en Colombia*”, el cual aplica el inventario y la evaluación nacional del recurso hídrico nacional a nivel superficial, con el fin de fijar las prioridades hídricas y así orientar los recursos disponibles.

El Código Nacional de los Recursos Naturales 2811 de 1974, establece en el Artículo 80 el dominio público de las aguas superficiales y subterráneas, haciendo hincapié en que el agua por ser de estado público, su utilización se establece como un derecho con el fin de colmar la necesidad básica de este recurso indispensable para la vida humana, vegetal y animal. En el capítulo III del mismo código, hace referencia a las cuencas hidrográficas, las áreas de manejo especial, creando las bases para el desarrollo de los Planes de Ordenamiento de las Cuencas Hidrográficas (POMCA) los cuales, como herramientas conjuntas, permiten realizar la planificación de las áreas intervenidas de forma holística, teniendo en cuenta el suelo, la flora y la fauna y las poblaciones, permitiendo el buen uso del ecosistema y convirtiendo ello en todo un conjunto de oportunidades para potenciar el desarrollo de la población sin procurar efectos adversos a la naturaleza.

Ley 152 de 1994 Ley Orgánica del Plan de desarrollo, la cual establece los procedimientos y mecanismos para la elaboración, aprobación, ejecución, seguimiento, evaluación y control de los planes de desarrollo.

Ley 99 de 1991, por medio de la cual se crea el Ministerio de Medio Ambiente con sus funciones, se realiza un reordenamiento de las actividades de cada uno de los ministerios, se incluye el concepto de desarrollo sostenible, en el Artículo 33 se crean y transforman las Corporaciones Autónomas Regionales, en este caso de CORPOBOYACA, que tiene

jurisdicción sobre la cuenca alta del Río Chicamocha, tiene su sede principal en la ciudad de Tunja, está a su cargo todo el departamento de Boyacá a excepción de algunos municipios que por su ubicación geográfica serán parte de la Corporación Autónoma Regional del Cundinamarca y la Corporación Autónoma Regional de Chivor.

Ley 388 de 1997 el cual permite a los municipios tener autonomía, iniciando el uso equitativo del suelo, la defensa del patrimonio ecológico y el desarrollo de urbanismo eficiente; da las directrices con el fin de la regulación del crecimiento poblacional, con el objetivo de tener condiciones dignas para la sociedad actual. Así mismo establece la generación de multas por asentamientos de viviendas en las rondas de los cuerpos de agua o en terrenos no urbanizables.

Ley 614 de 2000, establece los mecanismos de integración, coordinación y armonización de las diferentes entidades para la implementación de los planes de ordenamiento territorial.

Ley 1712 de 2004 permitiendo el derecho al acceso de la información pública.

Ley 1450 de 2011 se expide el plan nacional de desarrollo y en su artículo 206 se establece el área de ronda de río, a partir del cual las corporaciones autónomas deben determinar dichas áreas.

Ley Orgánica del Ordenamiento Territorial esta ley está conformada por 5 títulos, donde se destaca la puesta en marcha de las zonas de inversión, con el fin de promover el desarrollo del país por medio de la conectividad nacional iniciando la construcción de las vías del tren del caribe, autopistas, zonas portuarias, entre otros y los modelos de integración regional causando la promoción de proyectos productivos.

Decreto 2857 de 1981, con la finalidad de definir una cuenca hidrográfica, aclarando cuáles son los objetivos de delimitar la cuenca y cuáles son las prioridades de la ordenación de estas.

Decreto 1729 de 2002 el cual determina y explica qué es una cuenca hidrográfica, cómo se delimita y cuál es su uso con respecto a los lineamientos y características que tiene cada una de ellas en particular, cumpliendo con las directrices del código nacional de los recursos naturales y la necesidad de hacer un uso eficiente de la misma.

Decreto 1640 de 2002, propone los instrumentos para realizar la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas.

Decreto 1480 de 2007 en el cual se priorizan e intervienen las cuencas, dentro de ellas se encuentra la Cuenca del río Chicamocha ya que como se expresa en el artículo primero de este mismo decreto, entra en la lista de las cuencas priorizadas con el fin de obligar a las Corporaciones autónomas a tomar medidas para reducir el riesgo.

Decreto 2245 de 2017 en el cual se realizan las determinaciones de los acotamientos de las rondas de río, basados en la guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia; destacando dentro del ARTÍCULO 2.2.3.2.3A.2. la definición de ronda hídrica como *“Comprende la faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho”*.

Decreto único 1076 de 2015 el cual reúne toda la normativa vigente, donde se determinan las áreas boscosas siendo zonas protegidas, de las cuales no es permitido su uso comercial ni de asentamiento, incluyendo todos los nacimientos de las aguas, así mismo, determinan según cada río, las rondas o el espacio que debe encontrarse sin uso alrededor del mismo.

5. MARCO TEÓRICO

El aumento de las concentraciones de dióxido de carbono provoca que el calor en la tierra sea retenido, la producción de petróleo y carbón son los que más proporcionan este compuesto, teniendo como consecuencia, alteración en las estaciones, poca congruencia de las cabañuelas, sequías, inundaciones, incendios, tornados, entre otros; se tiene previsto que si no se realiza un cambio de la industria basada en el petróleo y el carbón podríamos estar aumentando en un cincuenta por ciento la concentración de dióxido de carbono, aumentando entre 1,6 grados centígrados y 5,5 grados centígrados en un lapso mediano de tiempo.(Motavalli Jim, 2004)

Los vientos alisios que vienen desde el oriente del continente Sur americano hacia Asia y Oceanía, (Martin Vide Javier, 1991) son los que provocan la interacción entre los océanos y la atmosfera permitiendo que produzca el intercambio de materia y energía, pero cada 4 a 7 años (depende el autor cambia este periodo de tiempo) se produce el fenómeno del Niño, en el cual los vientos dejan de circular de oriente a occidente y se presenta una corriente cálida en sentido contrario, de occidente a oriente, al encontrarse con la cordillera de los Andes se condensan y provoca precipitaciones que superan los históricos anuales de manera exuberante, los niveles del mar aumentan y con ellos la sequía en Australia, provocando el fenómeno contrario vuelven los vientos de oriente a occidente, impulsando precipitaciones en Oceanía y llegando el fenómeno de la niña en Sur América, sequías y falta de recursos están a la orden del día. (Montealegre Bocanegra José Edgar y Pabón Caicedo José Daniel, 2000).

5.1 Cambio Climático

Los modelos de circulación global permite dar una idea completa de los cambios climáticos, basándose en simular diferentes concentraciones de Dióxido de Carbono (Barros, 2006).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), el cual fue creado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en conjunto con el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), tiene como fin brindar información a los

diferentes países con respecto al cambio climático, siendo una herramienta para el desarrollo de políticas ambientales. “*Acerca de IPCC*” (www.ipcc.ch)

El Instituto de Hidrología, Meteorológico y Estudios Ambientales por medio del programa RClimDex, del Departamento de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá, realiza estudios bajo escenarios de cambio climático, con base a información de temperatura y precipitación dentro de los periodos de 1971 y 2010, de “*totales anuales para 86 estaciones, ubicadas en las principales ciudades de Colombia*” (Mayorga Ruth, Hurtado Gonzalo, & Benavides Henry, 2011) con el fin de monitorear dichas simulaciones con respecto al tiempo.

Según los resultados para el territorio nacional y con respecto al área de estudio de la cuenca alta del Rio Chicamocha, se encuentra que la precipitación en 10 años tendrá un aumento del 0.9% y en la temperatura de 0.17 °C, por cada década.(Mayorga Ruth et al., 2011).

Según otro estudio realizado por la Corporación Autónoma de Cundinamarca (CAR) por medio del modelo climático regional Proporcionar Climas Regionales para Estudios de Impactos PRECIS del Centro Meteorológico de Hadley del Reino Unido, el escenario de referencia está dentro del periodo 1970 y 2000, donde el primer periodo que se analizo fue entre el 2011 y 2040, donde se reflejó que habrá un incremento de la temperatura entre 0.7 y 1.4 grados centígrados y de precipitación del 10%,entre el 2041 y 2070, se determinó un aumento de temperatura entre 1 y 2 grados centígrados y una disminución entre 10 y 30% de precipitación en el sector del altiplano.(Car et al., 2011)

Se evidencia un aumento de temperaturas constantes, pero a nivel de precipitaciones estas son crecientes y superando 1 grado centígrado, se aumenta la evapotranspiración y se disminuyen los caudales. (Car et al., 2011)

Para atender estas alteraciones atmosféricas que perjudican el índice de agua presentes, se da origen a modelos hidrológicos, de control y modelación cuyo objetivo es explicar de forma gráfica la realidad de un fenómeno, al día de hoy no se tiene gran exactitud en dichos modelos ya que hay presencia de grandes variables que pueden generar errores, los cuales son corregidos por medio de la calibración. (Andrade y Blacutt ., 2010)

Los modelos se caracterizan por considerar los siguientes criterios:

- El sistema: “*la porción del Universo que será objeto de simulación*”. Es el punto en donde se enfocará el estudio, formado por varias *entidades* que se comunican entre ellas y cada entidad está formada por una sub entidad que es denominada *variables*, las características de las *variables* darán el comportamiento o el rasgo del sistema siendo *estático*, que se mantiene durante el tiempo; bajo una alteración el sistema vuelve a sus valores o puede ser *dinámico*; cuando el sistema se aleja después de haber sido alterado, donde es variable, aunque este puede llegar a transformarse en *estático* en el tiempo (Law y Kelton, 1991)
 - Las variables entrantes: son fijadas por las condiciones del sistema, estas pueden ser constantes o pueden ser operadas por el modelador.
 - Variables salientes: son los resultados arrojados por la simulación, la cual es dependiente de las variables entrantes.
 - Variables de estado: son las variables mínimas que requiere el sistema para poder realizar una simulación.

Teniendo claridad de lo que corresponde es un sistema, seguimos con la clasificación de los modelos, según Law y Kelton (1991), hay dos tipos los determinísticos y los estocásticos:

- El modelo es el objeto o herramienta que permite la simulación

Los modelos determinísticos corresponden a aquellos en los que sus variables son determinadas y no contiene elementos aleatorios.

Los modelos estocásticos son aquellas donde algunas variables son aleatorias y por lo tanto las variables de salida no se podrán afirmar.

- La simulación se define como el “*proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar acabo experiencias con él*”.(Law y Kelton, 1991)

Teniendo claro estos conceptos se hace necesario centrarse en los modelos que han ofrecido alternativas más claras en el manejo de datos que coinciden con las condiciones que presenta la cuenca en estudio; entre los modelos más representativos en la modelación hidrológica se encuentra los modelos de Bartlett-Lewis, estos modelos estocásticos pueden representar las precipitaciones en grandes periodos de tiempo.

El modelo Original BL modelo OBL, se comporta como una entrada de datos los cuales modelan gráficamente la intensidad en el eje vertical y la duración en el horizontal, demostrando que en el momento en que se genera una precipitación esta lo hace de manera exponencial y decae en forma continua, estos son representados por unas celdas, una de duración y otra de intensidad, representada en diagramas que los llaman pulsos rectangulares, cada evento de lluvia sigue una distribución geométrica que se basa en estos dos factores, representándolos de manera geométrica en el modelo.

Existe otro modelo BL2n, en el cual se representa cada celda de manera independiente, los más comunes son valores medios de precipitación; en zonas con precipitaciones muy poco variables. (Ibrahim et al., 2011)

Dentro de los modelos determinísticos se encuentra el Modelo de Sistema Hidrológico HEC-HMS, este modelo utiliza el hidrograma unitario con el fin de obtener el caudal, teniendo como información base las precipitaciones y la morfología de la cuenca hidrográfica, esto ayuda a determinar un valor aproximado de la infiltración del agua en el suelo pudiendo calcular la escurrimiento. (Triviño y Ortiz, 2004)

Hydro-BID es un modelo determinístico que se basa en el proceso de calibración, el cual se fundamenta en una aproximación de los datos que se tienen como base para cada cuenca y los datos reales, que son los proporcionados por el usuario de la plataforma, centrándose en tres actividades: las variables de ingreso, las cuales en este caso no dependen de otro parámetro y son la precipitación y la temperatura, los parámetros que corresponde a unos valores estándar que pueden ser modificados por el modelador mientras estén entre el rango de seguridad del modelo, y finalmente las variables de estado las que dependen de diferentes aspectos, por ejemplo la evapotranspiración siendo esta una variable completamente dependiente de la temperatura y la humedad en el suelo, es otra variable de estado ya que depende de la precipitación. (Cabrera, s. f.)

Para llegar a entender Hydro- BID es necesario tener claro el concepto de ciclo hidrológico y el balance hídrico, este nos puede proporcionar información acerca de la capacidad que tiene el recurso, con estos mismos datos se puede realizar una comparación en un periodo de tiempo haciendo comprender las consecuencias de los diferentes eventos, creando un entendimiento del usuario de la plataforma y dándole una idea de lo que sucede en el modelo a la hora de la interpretación.

5.2 Ciclo Hidrológico y Balance Hídrico

El agua es el elemento esencial para el desarrollo y mantenimiento de la vida, se encuentra en tres estados: Sólido, líquido y gas (Martínez de Azagra Andrés y Navarro Hevia Joaquín, 1995)

El ciclo hidrológico es la demostración del transporte del agua en la tierra en todos sus estados, el agua que se encuentra en los ríos, lagos, lagunas, el mar y los océanos es evaporada por la energía solar que también hace que se dé la evaporación terrestre o “*evaporación directa sobre el suelo*” y la evapotranspiración, todo este volumen de agua se transforma por medio de la condensación y se vuelve en precipitación de diferentes formas como nieve, lluvia, granizo entre otros, ésta se infiltra hasta que anega el suelo y empieza el recorrido por medio de la escorrentía superficial, subsuperficial y subterránea. (Martínez de Azagra Andrés y Navarro Hevia Joaquín, 1995)

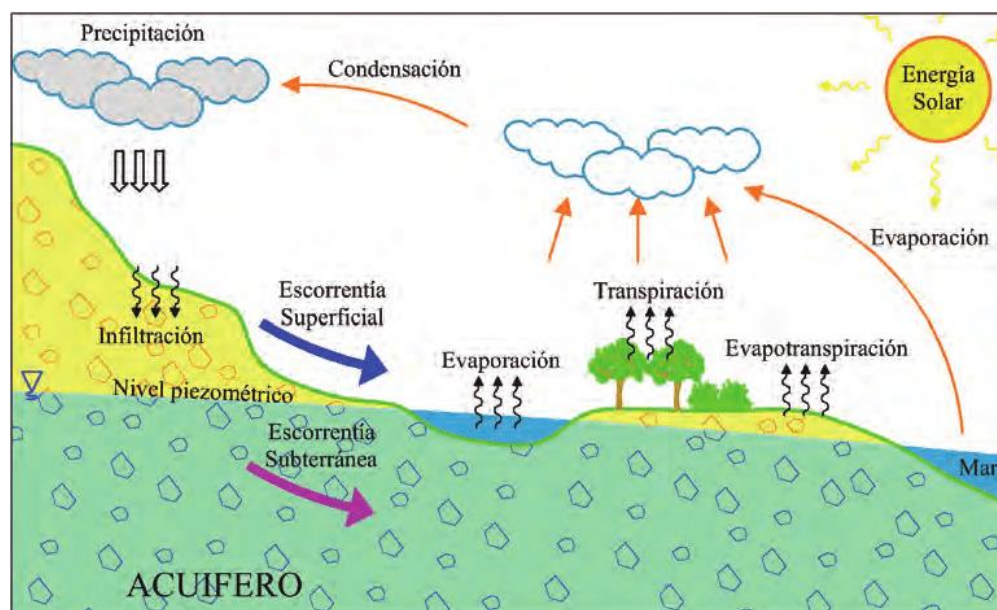


Figura 2. Representación del ciclo hidrológico *tomado de*

(https://www.researchgate.net/profile/David_Sanz4/publication/315336227/figure/fig1/AS:556918478913536@1509791120640/Figura-1-Esquema-del-ciclo-hidrologico-Modificado-de-Martinez-Alfaro-y-cols-2006.png)

Teniendo en cuenta las características anteriores, es importante determinar el volumen de agua acumulado por medio de una ecuación matemática en la cual deben estar presentes unas entradas y unas salidas, las cuales están igualadas como un balance de masas, siendo la principal limitante el agua almacenada en el suelo, ya que éste será el determinante de

que se produzca o no la escorrentía, derivando a un caudal de agua en la cuenca. (Triviño Pérez y Ortiz Rojas, 2004)

La escorrentía es una parte de la precipitación que transporta un volumen de agua, que se puede presentar en dos tipos:

- la pluvial que corresponde a la lluvia.
- la nival que corresponde a presencia de nieve.

(Martínez de Azagra Andrés y Navarro Hevia Joaquín, 1995)

En el Altiplano Cundiboyacense no cae nieve, por lo tanto, la escorrentía pluvial es la que se debe considerar para el caso, razón por la cual es necesario aclarar algunas clases de ella.

- La escorrentía superficial, es el agua que no se infiltra en el suelo durante una precipitación cuando ella es intensa, en cuyo caso el suelo colma su capacidad de retención de agua (anegado) haciendo que la misma viaje por el suelo por acción de la gravedad y la pendiente del terreno.
- Escorrentía Hipodérmica, es la saturación de los horizontes superficiales del suelo. Esta clase de escorrentía es un poco complicada ya que se mueve de forma horizontal por la pendiente de la zona y en ocasiones puede brotar del suelo y hacer parte de la escorrentía superficial.

Si bien hay un sin número de tipos de escorrentía, lo necesario de entender es que éstas hacen parte fundamental de la aportación de volúmenes de agua a los ríos. (Martínez de Azagra Andrés y Navarro Hevia Joaquín, 1995)

La precipitación es la entrada más importante en el balance por lo tanto se define como *“la caída de agua, en estado sólido o líquido, al suelo, a donde llega con una velocidad apreciable”* (Martín Vide Javier, 1991), también se tiene como entradas los caudales que aportan en la cuenca hidrográfica y las aguas subterráneas. (Heras, 1981), dentro de las salidas del balance esta la evaporación como cambio de fase de líquido a gas del agua (Martín Vide Javier, 1991) y la evapotranspiración considerando la humedad del suelo y el crecimiento de las plantas que también puede provocar pérdidas de agua, así mismo se tiene como salidas los caudales superficial y subterránea, claro está que el cálculo del balance hídrico puede ser tan complejo como las entradas y las salidas, que sean asignados

por el modelador, siendo el balance en su forma más simplificada la presentada en la ecuación 1:

$$P - ETP - Q - \Delta S - v = 0 \quad [1]$$

Donde P es la precipitación, ETP la evapotranspiración, Q el caudal de salida (descarga), ΔS es el volumen total acumulado y v es una constante de disminución de error. Dependiendo el tiempo en el cual se esté calculando el balance se puede desprestigiar el volumen total acumulado, debido a que en el momento de hacer un balance durante el año hidrológico se puede asumir que el almacenamiento al terminar el año es 0 y comienza con ese mismo valor. (Heras, 1981)

Evaluando lo anterior, se puede determinar que para poder realizar el balance hídrico se tiene la necesidad de conocer las precipitaciones de la cuenca de estudio, la temperatura y el caudal que son los requisitos mínimos para empezar con la plataforma de Hydro-BID.

Hydro-BID es una herramienta lanzada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en el año 2014, es un sistema como ya antes se había mencionado, determinístico cuantitativo, que tiene como objetivo simular la hidrología y gestión de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe. (Rineer et al., 2014)

El Banco Interamericano de Desarrollo cuenta con una Base de Datos de Hidrología Analítica de América Latina y el Caribe LAC-AHD, esta base de datos es fundamental para el programa ya que cuenta con la representación de 300.000 subcuencas y redes de drenaje en un formato de archivo de forma, esta información es cargada y tratada en un principio como un sistema de información geográfico, en la plataforma SQLite se tiene toda la información requerida como imágenes satelitales, datos de clima, características del suelo; todo esto relacionado entre sí por cada sub cuenca, esta correlación se hace por medio de un identificador único llamado COMID y una plataforma de interfaz donde se desarrolla todo el proceso. (Rineer et al., 2014)

De manera específica Hydro-BID cuenta con una base de datos como entrada principal LAC-AHD, una herramienta de Sistema de Información Geográfica GIS que permite evaluar la cuenca y sus respectivas subcuencas, posee una interfaz Generalized Water Load Flows GWLF en sus siglas en inglés significa factor de carga de flujos generalizados, entre los datos obtenidos del GIS y los del propio sistema permitiendo determinar el volumen de escurrimiento de cada subcuenca y cuenca por medio de nodos de interconexión, generando

un balance hídrico, en seguida son ingresados los atributos de entrada por el modelador en la plataforma Hydro-BID la cual genera tablas estadísticas comparativas relacionando los datos generados de la interfaz y los “reales” o datos de entrada. (Moreda et al.,2014)

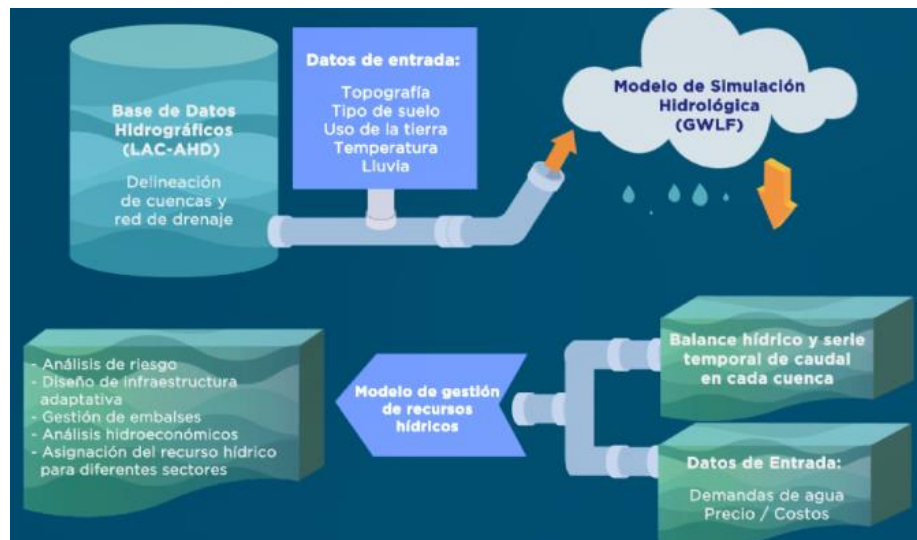


Figura 3. Funcionamiento de Hydrobid tomado de (<http://sp.hydrobidlac.org/sobre-hydrobid>)

La AHD-LAC es una base de datos vectorial, los cuales estan representados por puntos, lineas y poligonos, muy util ya que le da una característica propia a cada segmento fluvial, la Base de Datos de Hidrologia Analitica de America Latina y el Caribe “*contiene información geo espacial analitica*” la cual es la información base que apoya los modelos de hidrografía regional, dando conectividad de los flujos de aguas arriba y aguas abajo, cuenta con los datos suficientes para generar los resultados de una forma gráfica, sus 4 características principales son:

- Estructura de polígonos la cual es asignada por medio de un número único de identificación a cada una de las cuencas.
- Estructura de los segmentos fluviales procedentes de la información otorgada por el modelador.
- Propiedades de interconexión entre los números únicos de identificación y los segmentos fluviales dando información exacta con respecto al área de estudio
- Estructura con la capacidad de adjuntar atributos extras.

Cada uno de los segmentos fluviales o subcuencas tiene características definidas como la pendiente, longitud, tipo de suelo, entre otros, estos atributos son derivados de la base de

datos AHD, el número de identificación único selecciona los atributos bajo estas características, generando una respuesta o salida de esta AHD. (Rineer et al., 2014)

Los segmentos fluviales dentro de la AHD se encuentran en su mayoría con un flujo conocido, esto significa que con respecto a la elevación del terreno el flujo toma una dirección, esta información se encuentra dentro del atributo dirección de flujo. (Rineer et al., 2014)

Con el fin de que este proceso tenga sentido se traslada la información a la plataforma de Hydro-BID para su respectiva calibración, el cual tiene como partida una primera “corrida” de datos los cuales determinan que tan alejados está el modelo simulado del observado, nos muestra una serie de pestañas las cuales nos servirán de herramienta de apoyo en el momento de calibración.

según Cabrera, (s.f.) en la pestaña de estadística, arrojada por el programa Hydro-BID, se encuentran los siguientes indicadores

- Volumen general de error es determinado por la diferencia entre el flujo simulado del modelo y el flujo generado por el modelador; basado en la ecuación 2

$$ove = \frac{\sum_{t=1}^N S_t - \sum_{t=1}^N O_t}{\sum_{t=1}^N O_t} * 100 \quad [2]$$

Donde N son los días de la simulación sin contar el primer año, el cual se considera de calentamiento, O_t es el flujo observado en el día t que comienza en el primer día del segundo año, S_t es el flujo del modelo simulado en el día t.

Su valor optimo es el más cercano a 0.

- La correlación o coeficiente de calibración: es la relación que tiene los datos modelados con los observados, según la ecuación 3 se puede determinar “que tan alejados están uno del otro”, tomando valores entre 0 y 1, siendo 1 una correlación lineal.

$$r = \frac{N \sum_{t=1}^N O_t S_t - \sum_{t=1}^N O_t \sum_{t=1}^N S_t}{\sqrt{\left[N \sum_{t=1}^N S_t^2 - \left(\sum_{t=1}^N S_t \right)^2 \right] \left[N \sum_{t=1}^N O_t^2 - \left(\sum_{t=1}^N O_t \right)^2 \right]}} \quad [3]$$

- La eficiencia de Nash Sutcliffe nos refleja la posibilidad que tiene el modelo de explicar el comportamiento de la realidad por medio de la ecuación 4.

Cuando los valores son menores a 0,2 son insuficientes, entre 0,2 y 0,4 es satisfactorio, entre 0,4 y 0,6 es bueno, entre 0,6 y 0,8 muy bueno, mayor a 8 es excelente.

$$r^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (S_t - O_t)^2}{\sum_{t=1}^N (O_t - \mu_0)^2} \quad [4]$$

La pestaña gráfica da un preámbulo del comportamiento de los caudales a nivel diario durante los años que se haya realizado la modelación.

La pestaña curva de duración de caudal refleja el comportamiento del mismo modelado con respecto al porcentajes de tiempo en donde se excede o limita del observado.

La pestaña Línea de regresión evidencia el comportamiento entre el modelo observado y el simulado.

La pestaña balance de agua proporciona datos de precipitación, infiltración, evapotranspiración, recarga entre otros.

Para realizar la calibración se cuenta con 6 factores que permiten que los datos modelados se acerquen a los datos reales, que son

- Numero de Curva que permite caracterizar el tipo de suelo.
- Contenido disponible de agua
- R coeficiente es determinante en la escorrentía, que se puede interpretar como el valor de agua infiltrada con respecto a los valores observados.
- Filtración que es la capacidad que tiene el suelo para infiltrar el agua a capas más profundas.
- Temporada de crecimiento que depende directamente del tipo de cultivo y su capacidad para evapotranspirar el agua.
- Temporada inactiva que representa la evapotranspiración en la temporada inactiva o en este caso cuando están en el proceso de postcosecha.

6. METODOLOGÍA

6.1 Obtención de Información

La obtención de datos se realizó a través del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), quienes suministraron datos de precipitación diaria acumulada en mm, caudales medios diarios en m³/s y temperatura media diaria en grados centígrados, en un intervalo de tiempo entre el 2008 y 2015 de la cuenca del río Chicamocha, así mismo se solicita el Plan de Ordenamiento y de Manejo de la Cuenca alta del Río Chicamocha a la Corporación Autónoma de Boyacá.

Con los datos obtenidos y organizados de acuerdo a los requerimientos de la plataforma se da inicio al trabajo y para ello se utiliza el software profesional SIG denominado Qgis (Quantum GIS) que visualiza, gestiona, y analiza datos de información geoespacial, el cual es importante para el proyecto ya que las estaciones que contienen información de caudales deben ser georreferenciados y permite ir ubicando el proyecto dentro del programa, seguidamente por medio de la herramienta ADH se definen el área de trabajo, aguas arriba.

Tabla 2: Localización de Estaciones de caudales, información recopilada de IDEAM

Estación	Latitud	Longitud
Capitanejo	6.513208056	-72.69545306
Duitama	5.807611111	-73.01380556
Nobsa	5.759888889	-72.90652778
Paipa	5.766733333	-73.10872222

Esta información es montada, junto con la imagen preliminar que es la base geográfica que trabaja con número único de identificación y divisoria de cuencas y subcuencas, las cuales tienen ya la información del área, el AHDflujo que contiene la información de los números únicos de identificación y el sentido del flujo y el AHDlinea asignación de los cauces con base al número único de identificación; por medio de la herramienta AHD se realiza la interrelación de estos cuatro elementos y es asignada una serie de números únicos de identificación para la cuenca de estudio.

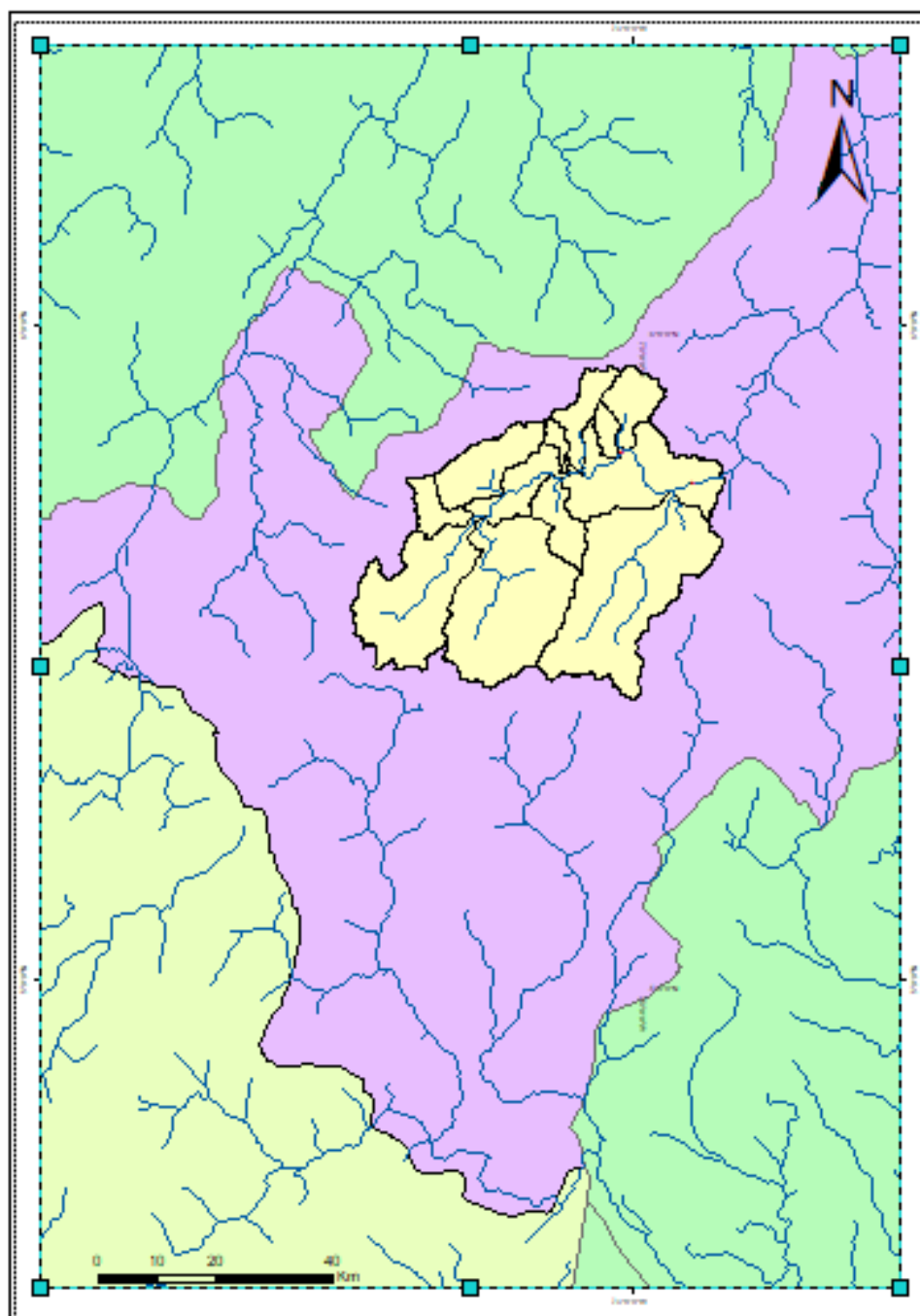


Figura 4. Área de estudio por medio de la herramienta AHD

El área de la caracterización y de drenaje de la cuenca es de 2158.74 Km² delimitada por la interfaz, la cual visualiza la misma, y una longitud total de los cauces que hacen parte de la cuenca de 211 Km; así mismo ubica las estaciones determinando el área de estudio, siendo la estación de Nobsa la que se encuentra aguas abajo y el proyecto se realiza con base a la información aguas arriba, esto también sirve para la conexión entre la información de AHD-LAC y la información cargada por el modelador, por medio de la generación del número de identificación único.

Se generan los números únicos de identificación que son relacionados, para ser llevados a la interfaz de Hydro-BID.

Lo importante para este proceso es que lo que está generando el Qgis tenga sentido con lo cargado, realizando un análisis de los datos dados colocándolos en la plataforma del Sistema de Información Geográfica.

Finalizando este proceso de verificación, se llevan los datos proporcionados a Hydro-BID y se hace la “corrida” del programa, el cual arroja como primera medida, sin realizar ningún tipo de calibración, lo expresado en la tabla 3:

Viendo que se tiene un error general de 0,68 significativamente alejado a 0, el coeficiente de correlación es positivo igualmente alejado de 1 y la eficiencia de Nash Sutcliffe se encuentra según lo antes mencionado por Cabrera, (s.f.) satisfactorio.

Tabla 3: Estadística para la verificación de la calibración, datos proporcionados por el programa Hydro-BID.

Estadística	Evaluación Diaria	Evaluación Mensual
Volumen general de error	12.14	0.68
Coeficiente de correlación	0.4	0.66
Eficiencia de Nash Sutcliffe	-0.24	0.37

Este módulo estadístico nos permitirá movernos en los rangos de seguridad con el objetivo de poder calibrar la cuenca y que ella esté acorde a los datos proporcionados y llevarlos a una situación de cambio climático.

Este espacio estadístico, refleja cómo es el comportamiento de los caudales medios bajo la realidad, manifestando la cercanía que tiene el modelo generado con los datos aportados en el espacio real, los errores menores al 40% se consideran aceptables, en lo cual tenemos desviaciones significativas en los años 2008 y 2015 dentro del error general del volumen que es determinado por la diferencia entre el flujo simulado del modelo y el flujo generado por el modelador. Evidenciando un error diario de 12.4% y mensual de 11.27% el cual no hace diferencia ya que está cerca al valor 0.

Visualizando el coeficiente de correlación se puede determinar que ella es positiva y debido a la diferencia entre el flujo observado y el flujo simulado, están directamente correlacionados. Se puede percibir la presencia de valores atípicos sobre el eje y de 325m³/s, se deduce que los valores observados y modelados están entre 0 y 175 m³/s aproximadamente, se puede concluir de la misma manera que los valores evidenciados son

mucho menores que los simulados dirigiendo la línea de mejor ajuste de forma negativa en el eje y.

La eficiencia de Nash Sutcliffe nos refleja la posibilidad que tiene el modelo de explicar el comportamiento de la realidad, en este caso la posibilidad que se establece es casi nula y por esta razón se prosigue a realizar la calibración y ajuste del modelo.

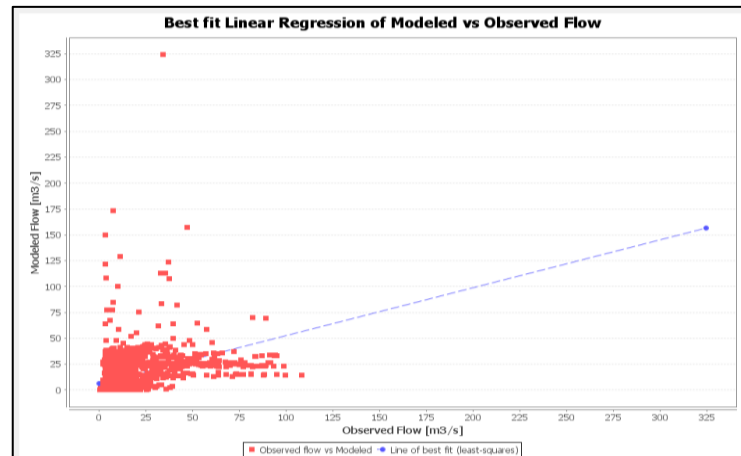


Figura 5: Regresión lineal entre el modelo simulado y el modelo observado

Se evidencia que los valores observados que corresponden al comportamiento diario de flujo son menores, así mismo se refleja un pico importante en los valores simulados entre el año 2011 y 2012, que puede ser el valor que se presenta como atípico en la gráfica de correlación, según la figura 6.

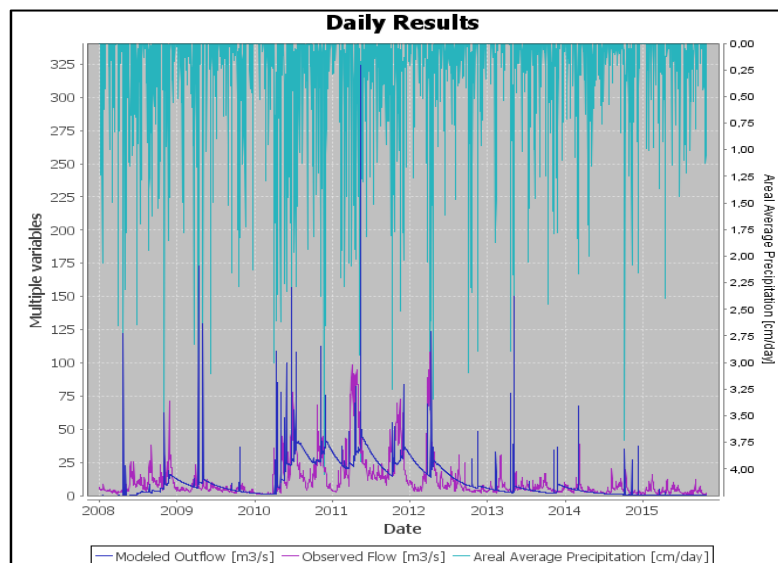


Figura 6. Comportamiento de caudales modelados y observados, frente a la precipitación

6.2 Calibración

La calibración se hace por medio de prueba y error, en donde se mejoran los valores dando una aproximación de la realidad en cuestión al comportamiento de los caudales modelados bajo el criterio de los caudales proporcionados, determinando que el volumen general de error se encuentra muy cercano a 0, el coeficiente de correlación no mejoro significativamente y la eficiencia de Nash Sutcliffe se encuentra dentro del rango bueno.

Tabla 4: estadística después de realizar calibración, datos proporcionados por el programa Hydro-BID.

Estadística	Evaluación Diaria	Evaluación Mensual
Volumen general de error	0.9	0.1
Coefficiente de correlación	0.33	0.67
Eficiencia de Nash Sutcliffe	-0.53	0.44

Como resultado de la calibración se podrá evidenciar un ajuste evidente de los caudales modelados; se ajustan significativamente a los caudales reales, según los valores atípicos ya evidenciados desde un inicio de la calibración y que no permitieron realizar reducción.

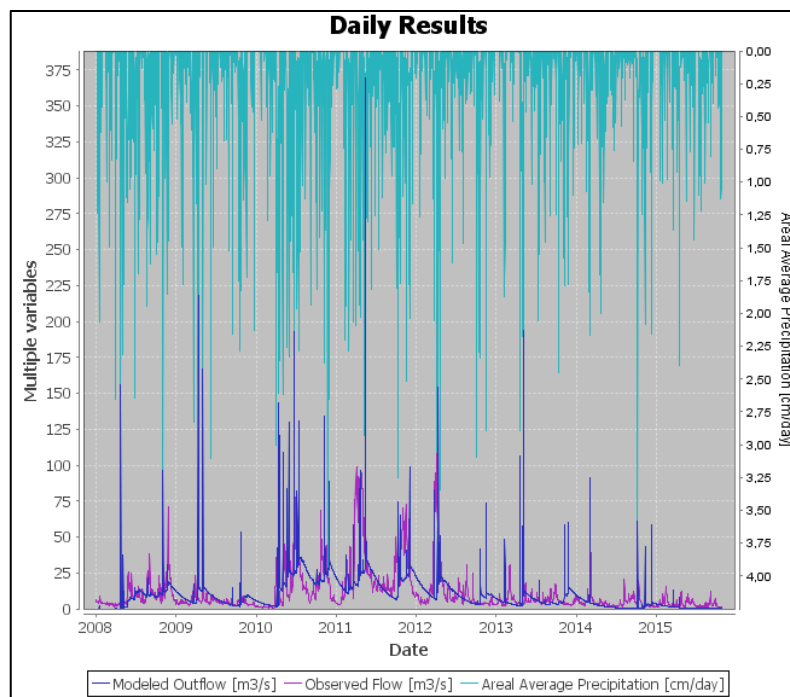


Figura 7. Resultado de la calibración realizada

La calibración permitió reducir el error diario en 0.9 y 0.1 mensual, la correlación bajó muy poco pero igual sigue siendo positiva y directamente correlacionada, mejoró de manera significativa la eficiencia de Nash Sutcliffe lo cual puede determinar que el modelo tiene la capacidad de explicar la realidad bajo el 44% lo que corresponde a un ajuste bueno.

El proceso de validación no pudo ser realizado debido a la falta de una serie temporal significativa (por lo menos 10 años) diferente que tuviera datos confiables, por lo tanto, con base a la calibración se realiza el proceso de cambio climático, sin la certeza que este proceso sea confiable.

6.3 Análisis Cambio Climático

A partir de los estudios de cambio climático que se ha realizado en Colombia, ya antes mencionados, se evidencia un aumento de temperatura constante y de precipitación durante los primeros 20 años y luego una disminución de ésta, por lo tanto, con los datos base de un periodo de 2008 y 2013, se realiza los siguientes escenarios de cambio climático para el año 2040.

- Escenario A: Aumento de temperatura de 1 grado centígrado y un aumento de precipitación del 10%.
- Escenario B: Aumento de temperatura de 1 grado centígrado, sin alteración de la precipitación.
- Escenario C: Aumento de temperatura en 1 grado centígrado y una disminución del 10% de la precipitación.

7. RESULTADOS

7.1 Modelo Base

La simulación base, es el punto de partida para realizar la evaluación del cambio climático bajo diferentes escenarios, se puede observar que la precipitación oscila entre $4.8 \text{ y } 7.8 * 10^{-4}$ Millones de metros cúbicos, la evapotranspiración se evidencia estable bajo el rango de $3.2 \text{ y } 3.5 * 10^{-4}$ Mm3, la escorrentía con una variabilidad alta se encuentra entre $1 \text{ y } 4.1 * 10^{-5}$ Mm3, Infiltración entre $1.3 \text{ y } 7.3 * 10^{-5}$ Mm3 y un total de caudal que esta entre $6.34 * 10^{-1}$ y 1.73 Mm3.

Tabla 5: Balance Hídrico Escenario Base, proporcionado por el programa Hydro-BID

Año	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía	Infiltración	Caudal total
	Escenario Base Mm3				
	Mm3	Mm3	Mm3	Mm3	Mm3
2008	0.00059	0.000349	0.0000102	0.0000332	0.434
2009	0.000478	0.00034	0.0000167	0.0000538	0.705
2010	0.000786	0.000343	0.0000415	0.000137	1.79
2011	0.000731	0.000343	0.0000245	0.000141	1.66
2012	0.000482	0.00033	0.0000154	0.000072	0.925
2013	0.000482	0.00032	0.0000171	0.0000492	0.663

En la figura 8 se observa en el eje x el intervalo de tiempo de estudio que se encuentra entre 2008 y 2014, en el eje y a la izquierda se encuentran los valores de caudal en unidades de m3/s y al lado derecho está representando la precipitación media en cm/día, esta figura representa en una sola imagen las entradas y salidas en un balance hídrico viendo como las precipitaciones son la mayor influencia en la presencia de los caudales en la cuenca.

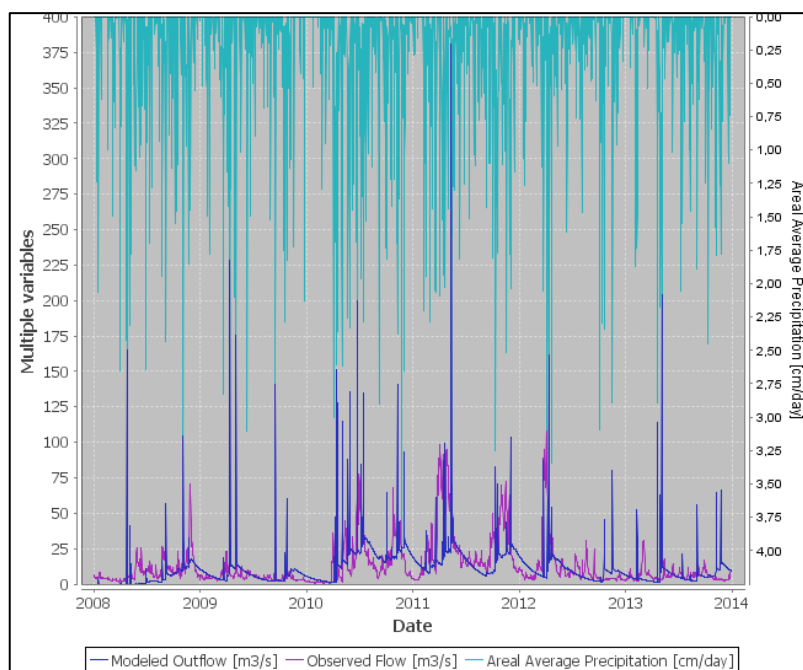


Figura 8. Escenario Base.

Se puede observar en la figura 9 que entre el 2008 y 2014 la temperatura media diaria se encuentra entre los 15 y 20 grados centígrados hasta mediados de 2012, después ella baja estando aproximadamente entre los 7 y los 17 °C al finalizar el 2014.

Se puede identificar que entre el 2009 y el 2010 hubo una época seca y entre el año 2010 y 2011 y 2011 y 2012 se ven reflejados dos picos característicos de una precipitación bimodal, decayendo los caudales entre el primer tercio de año de 2012 hasta el 2014.

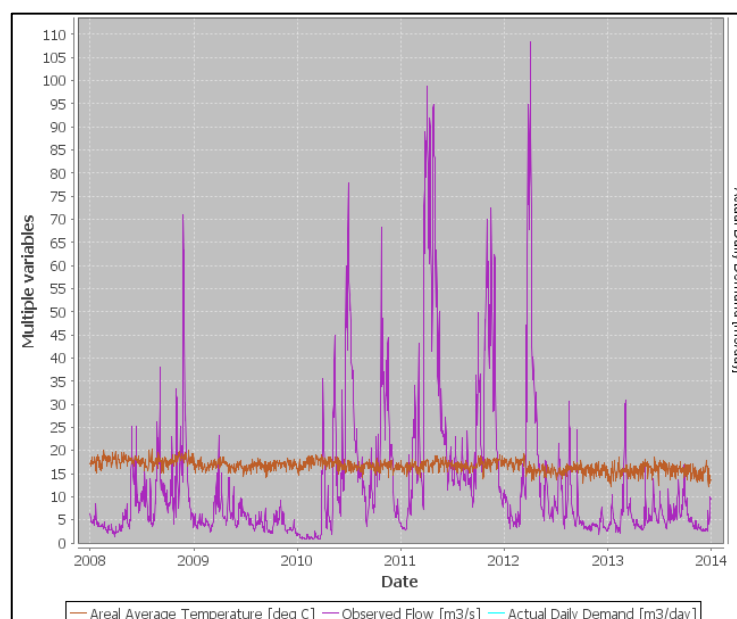


Figura 9. Escenario base comportamiento del caudal observado respecto a la temperatura.

Se puede observar en la figura 10 que durante el 2008 y el 2014 hubo precipitaciones durante la mayoría del año exceptuando a final de 2009 e inicio de 2011.

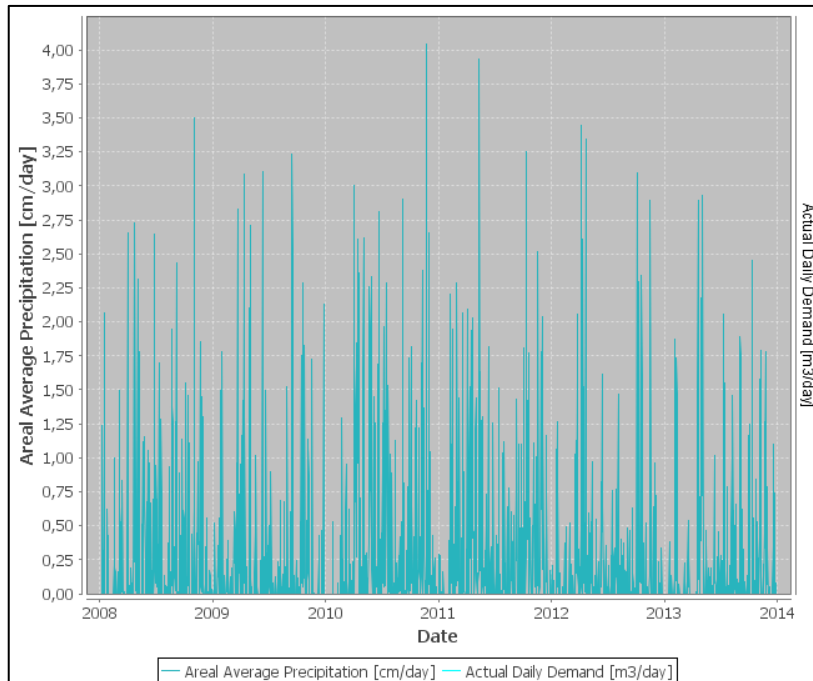


Figura 10. Comportamiento de la precipitación, escenario base.

La infiltración del suelo en la figura 11, se puede correlacionar con la precipitación, como se puede observar entre el año 2010 y 2012 donde hubo mayor precipitación, también hubo mayor infiltración en el suelo.

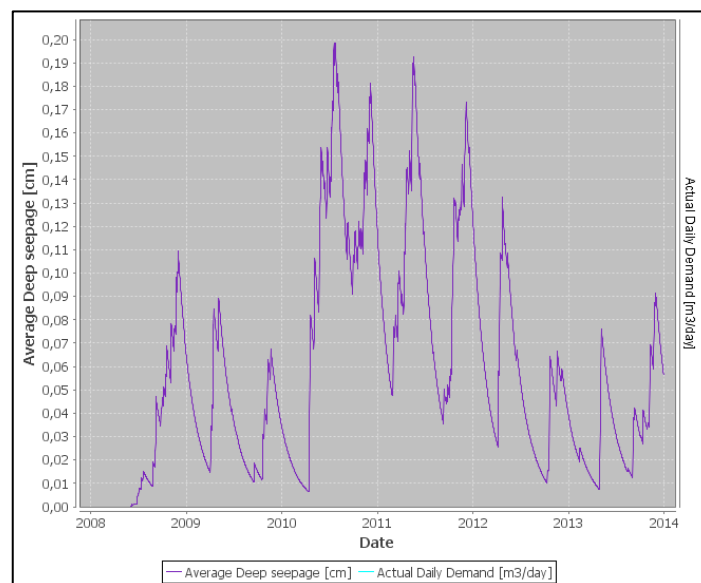


Figura 11. Comportamiento de la infiltración en escenario base

7.2 Comparación de los diferentes escenarios de cambio climático con la simulación base.

Tabla 6:Balance Hídrico Escenario Base, proporcionado por el programa Hydro-BID

Año	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía	Infiltración	Caudal total
	Escenario Base Mm3				
2008	0.00059	0.000349	0.0000102	0.0000332	0.434
2009	0.000478	0.00034	0.0000167	0.0000538	0.705
2010	0.000786	0.000343	0.0000415	0.000137	1.79
2011	0.000731	0.000343	0.0000245	0.000141	1.66
2012	0.000482	0.00033	0.0000154	0.000072	0.925
2013	0.000482	0.00032	0.0000171	0.0000492	0.663

Tabla 7:Balance Hídrico Escenario A, proporcionado por el programa Hydro-BID

Año	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía	Infiltración	Caudal total
	Escenario Base Mm3				
2008	0.000627	0.000353	0.0000148	0.0000423	0.571
2009	0.000511	0.00034	0.0000197	0.0000654	0.851
2010	0.000843	0.000343	0.0000562	0.000153	2.094
2011	0.000788	0.000343	0.0000347	0.000159	1.94
2012	0.000525	0.000326	0.0000222	0.000093	1.15
2013	0.000513	0.00032	0.0000234	0.000059	0.823

Tabla 8:Balance Hídrico Escenario B, proporcionado por el programa Hydro-BID

Año	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía	Infiltración	Caudal total
	Escenario Base Mm3				
2008	0.00059	0.000349	0.0000102	0.0000332	0.434
2009	0.000478	0.00034	0.0000167	0.0000538	0.705
2010	0.00079	0.000343	0.0000415	0.000137	1.79
2011	0.000731	0.000343	0.0000244	0.000141	1.66
2012	0.000482	0.000326	0.0000154	0.0000772	0.926
2013	0.000482	0.000319	0.0000171	0.0000492	0.663

Tabla 9: Balance Hídrico Escenario C, proporcionado por el programa Hydro-BID

Año	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía	Infiltración	Caudal total
	Escenario Base Mm3				
2008	0.000513	0.000344	0.00000522	0.0000127	0.179
2009	0.000418	0.00034	0.00000899	0.0000319	0.408
2010	0.00069	0.000343	0.0000277	0.000106	1.33
2011	0.000644	0.000343	0.0000163	0.000111	1.27
2012	0.00043	0.000326	0.0000102	0.0000565	0.667
2013	0.00042	0.000319	0.0000103	0.0000285	0.388

En el escenario A se puede observar, un aumento de la precipitación en una unidad de millones de metros cúbicos presentando incrementó entre 0.09 y 0.05 en las centenas, la esorrentía también reflejó un aumento, así como su infiltración.

Según el escenario B se observa un aumento poco marcado de la evapotranspiración, sin ningún otro cambio.

En el escenario C, se evidencia una baja de precipitación con respecto a la simulación base, la evapotranspiración se comporta con menor pérdida de agua, la esorrentía aumenta y la infiltración es disminuida significativamente.

Se observa en la figura 12 que la mayor precipitación se da en el escenario A, el comportamiento del escenario base con el escenario B no tienen cambios significativos, donde el aumento de precipitación y de temperatura no darán cambios relevantes en la precipitación, el escenario más desfavorable es el C.

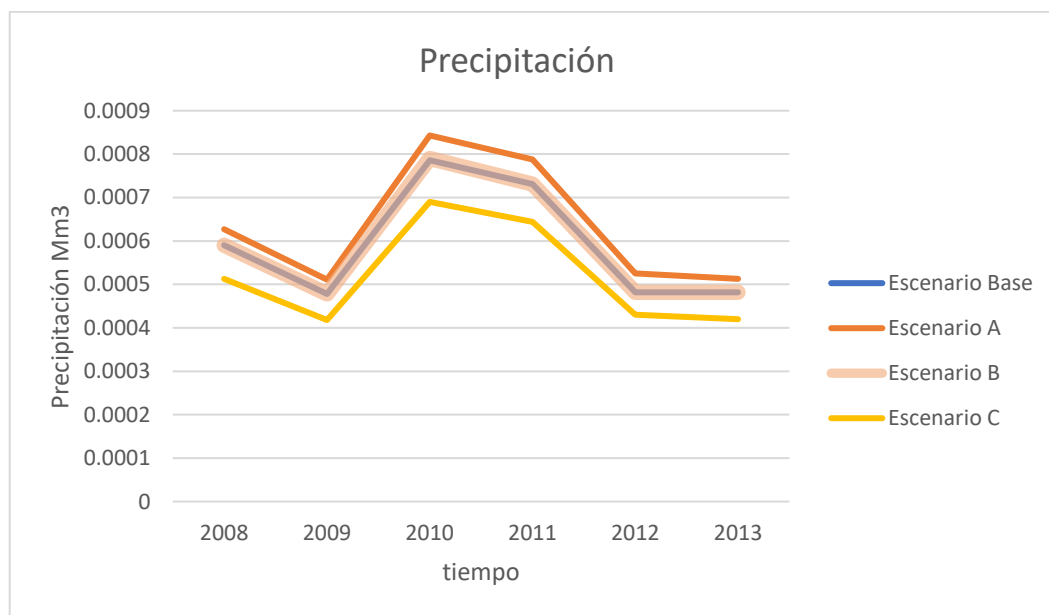


Figura 12. Precipitación diferentes escenarios

Se identifica que en la figura 13 la evapotranspiración en todos los escenarios de cambio climático es descendente con la particularidad que siendo el escenario C el más bajo en la precipitación pareciera no verse afectado.

En el escenario base decae de forma más fuerte y los escenarios A, B y C desciende su evapotranspiración de forma conjunta. Durante el 2010 y 2011 se puede observar un incremento debido a las precipitaciones de esos mismos años.

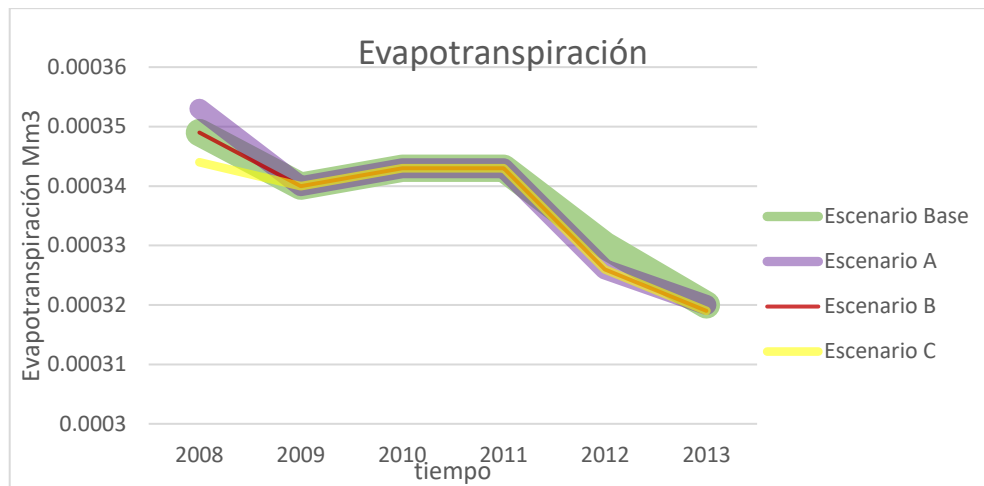


Figura 13. Evapotranspiración bajo diferentes escenarios

Se puede evidenciar en la figura 14 que la escorrentía en el escenario A es notablemente mayor frente a los otros tres escenarios, así como en el escenario C se observa una escorrentía con menor volumen.

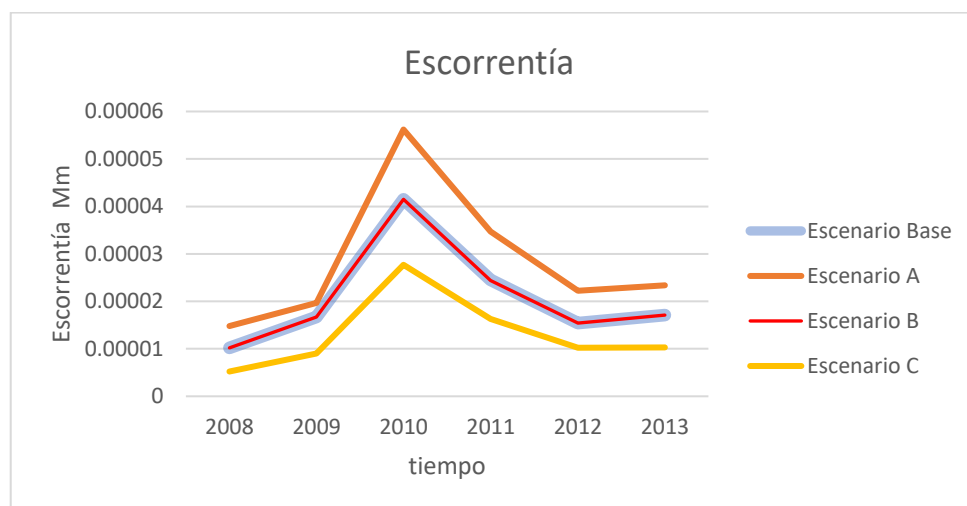


Figura 14. Escorrentía bajo diferentes escenarios

Así como la escorrentía, la infiltración se comporta muy parecido por dentro de estos mismos escenarios se evidencia mayor presencia en el escenario A y menor en el C y el escenario base y B se comportan de forma similar, visualizando en la figura 15.

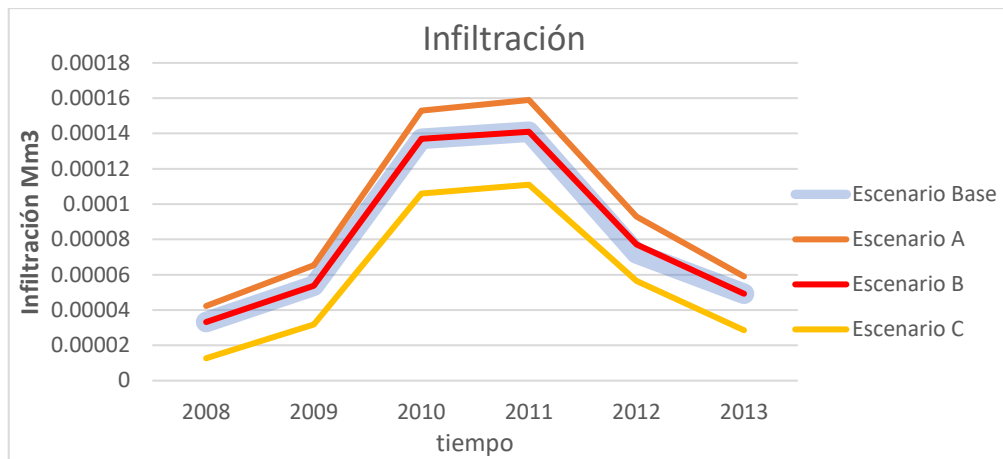


Figura 15. Infiltración bajo diferentes escenarios

En la figura 16 se puede evidenciar que el escenario A es donde se presenta mayor caudal a pesar del aumento de la precipitación, infiltración y evapotranspiración; los escenarios base y B no se ven afectados en el caudal total, el caudal se ve fuertemente afectado por el escenario C.

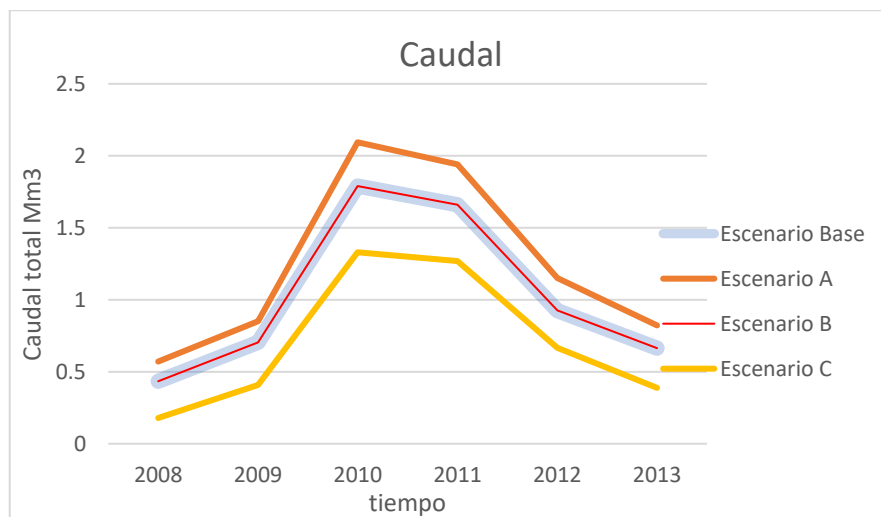


Figura 16. Caudal en diferentes escenarios

A partir de los gráficos en comparación del comportamiento de los caudales de cada uno de los escenarios, bajo el rango de temperatura media diaria, en la figura 17, se puede observar que no son notablemente diferenciadores, esto podría explicarse por las aportaciones de las aguas subterráneas del lugar.

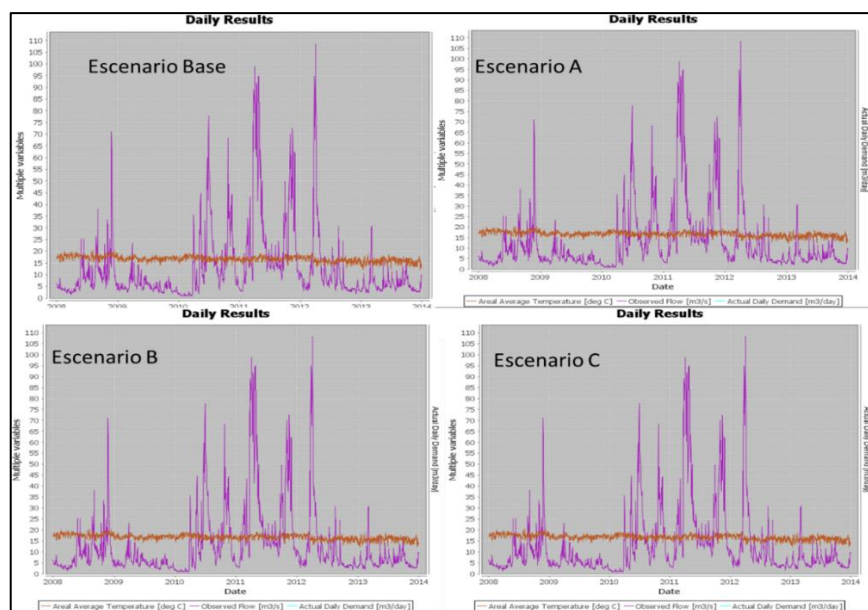


Figura 17. Diferentes escenarios con respecto al caudal observado y la temperatura

En la figura 18 se puede identificar que el escenario A en comparación del escenario base, presenta un aumento de la precipitación de alrededor de 0.05 cm/día aproximadamente, entre el escenario A, el escenario B presenta un aumento de la temperatura sin alteración de la precipitación, entre el escenario B y C se identifica una disminución de 0.005 cm/día en el escenario C.

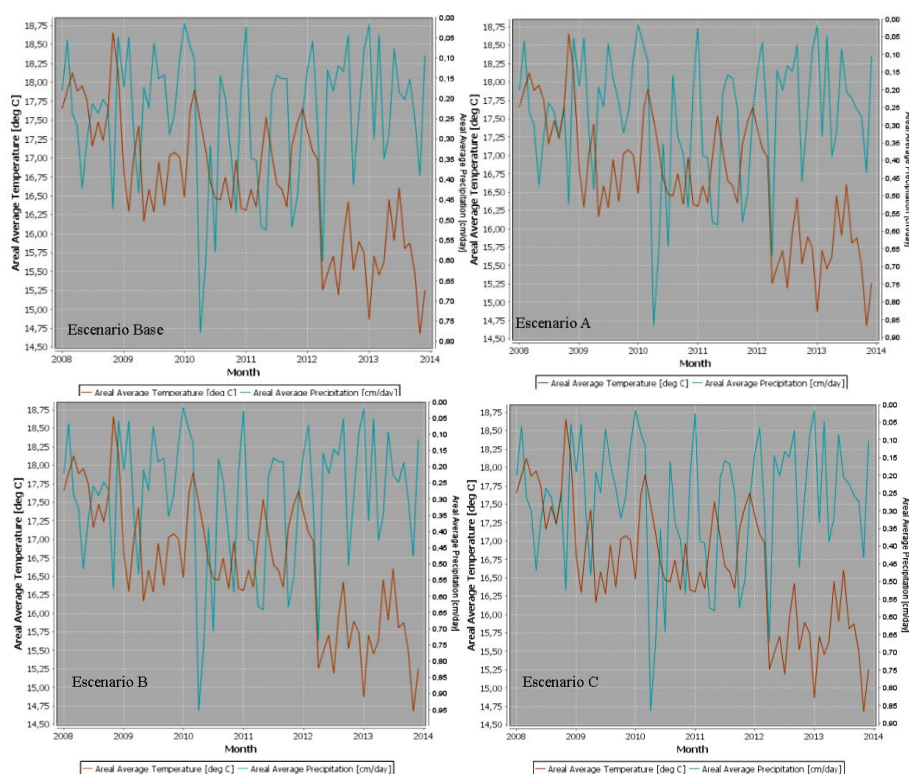


Figura 18. Temperatura y precipitación bajo diferentes escenarios

Como se puede observar en la figura 19 entre el escenario base y el A, se puede identificar un cambio significativo en la escorrentía de 0,22 cm/día; así como se evidencia que el escenario B no se ve afectado por este. en el escenario C se puede evidenciar una escorrentía menor a los escenarios A y B pero no menor al escenario base.

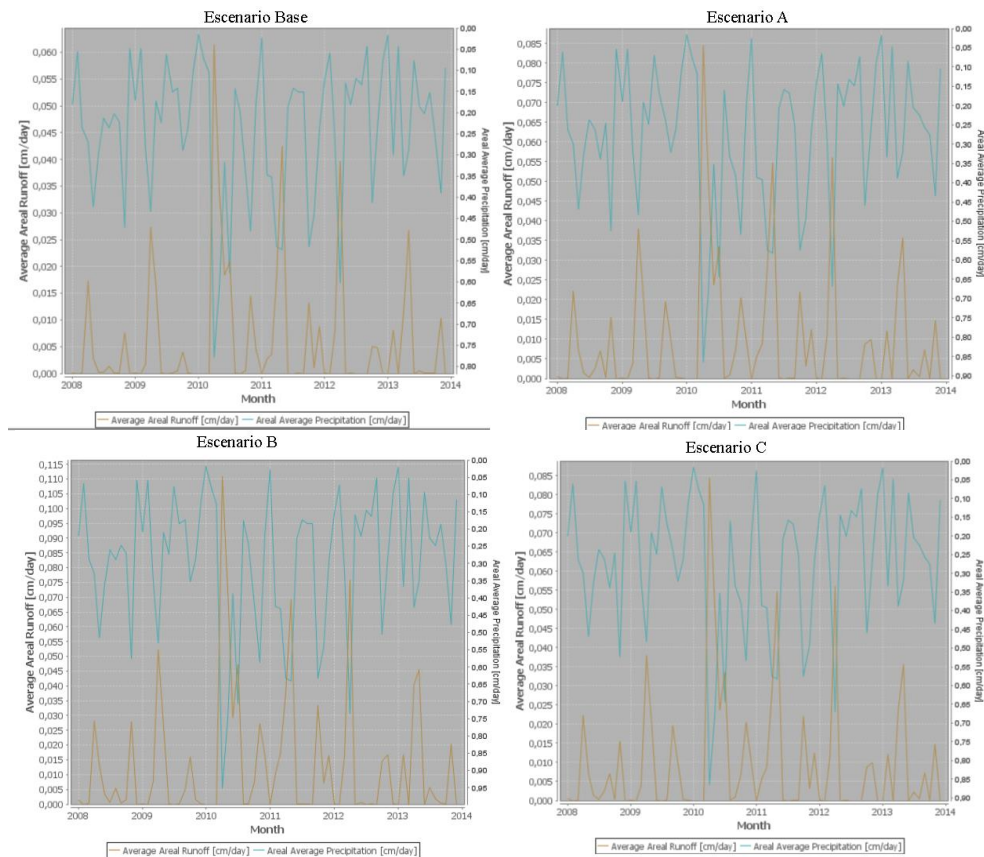


Figura 19. Escorrentía y precipitación bajo los diferentes escenarios

8. CONCLUSIONES

Dentro del análisis de evapotranspiración se puede concluir que todos los escenarios son continuamente descendentes con la particularidad del escenario C el cual se está viendo afectado por la disponibilidad de agua en el suelo.

Frente a la evaluación de la escorrentía y la precipitación con todos los escenarios se puede concluir que en el escenario A donde la temperatura es aumentada un grado centígrado y un aumento de la precipitación, se provoca una alteración en el volumen de la cuenca, esto podría ocasionar desastres, deslizamientos de tierra, inundaciones y pérdidas en cultivos e infraestructuras.

Sobre los resultados obtenidos bajo los diferentes escenarios de cambio climático, se puede establecer que la peor situación a la que se enfrentaría la cuenca del río Chicamocha es bajo el escenario C, el cual aumenta la temperatura y disminuye la precipitación, viendo alteraciones en las aportaciones de caudal total.

La calibración y la exactitud del modelo depende del modelador y la habilidad que tenga para dominar el mismo. Se requiere contar con datos suficientes y precisos ya que los rangos en los mismos, en el caso de Colombia, no son completos ni suficientes lo que generan dificultades en el aprovechamiento de la herramienta. Así mismo, los valores variarían de manera importante teniendo en cuenta la influencia del uso del suelo, infiltración, pendiente, entre otros.

Con base a la información aportada por la Corporación autónoma de Boyacá, la cuenca alta del río Chicamocha tiene como demanda $4.5 \cdot 10^{11}$ millones de metros cúbicos al año y viendo la disponibilidad de agua que se tiene estas necesidades son satisfechas sin alterar los caudales ecológicos.

Es necesario para futuros estudios tener en cuenta el proceso de validación con series de tiempo significativas de caudal, precipitación y temperatura, que sean confiables y puedan desarrollar la realidad.

El departamento de Boyacá con respecto a la cuenca alta de Chicamocha no se encuentra listo para Hydro-BID, ya que la falta de datos es significativa y el proceso de recopilación de estos, depende de varias entidades como el IDEAM, Corporación Autónoma de Cundinamarca, Corporación Autónoma de Boyacá, Empresas Públicas de Boyacá, Universidades, entre otros, los cuales tienen estaciones meteorológicas, pero sus datos son

variables y poco confiables, ya sea por ausencia de datos, estaciones suspendidas o de difícil acceso.

9. DISCUSIÓN

Con base a los resultados del Plan de Ordenamiento y Manejo Ambiental de la Cuenca Alta del Río Chicamocha, reflejan que tienen índices de escasez en algunos de las subcuencas del río, pero a nivel global éste no presenta una pérdida importante del caudal ni se ve afectado por los caudales ecológicos que deben ser respetados, según el estudio realizado para la cuenca, las demandas son bajas sin dejar de percibir que pueden ser un poco más altas por las captaciones individuales muy comunes en esta área, así mismo tampoco se evidencia afectación con los caudales ecológicos. (Car et al., 2011)

Así como el estudio realizado por la Corporación Autónoma de Cundinamarca de cambio climático, demuestra que un aumento de la temperatura va a generar un aumento en las precipitaciones, este resultado se ve reflejado dentro de lo simulado con Hydro-BID, en el escenario A donde se altera la precipitación y se hace un aumento de temperatura de 1 grado centígrado. (Car et al., 2011)

Este mismo estudio de la corporación Autónoma de Cundinamarca refleja que se tendrá un aumento de evapotranspiración de un 30% lo que concuerda exactamente con el resultado de la simulación del escenario A. (Car et al., 2011)

10. RECOMENDACIONES

Siendo Hydro-BID una herramienta que pretende mejorar las condiciones de manejo de las realidades de la presencia de agua en América latina, se debe priorizar la implementación de esta, como una forma eficiente de medir el impacto de los cambios climáticos y poder determinar acciones que limiten las consecuencias de los desastres naturales para la especie humana.

La herramienta Hydro-BID implementada de manera correcta y teniendo en cuenta las condiciones particulares de cada suelo será un instrumento importante en la proyección de cosechas y tiempo de postcosecha, así como también en la planeación de cambio de actividades económicas derivadas de la disponibilidad del recurso agua.

Se requiere capacitar a personas en el manejo correcto y cuidadoso de las estaciones de tal manera que los datos arrojados por estas sean confiables y suficientes, o de otra manera el programa Hydro-BID no podría aportar su ayuda a un país ubicado en su espacio de acción y que tiene una gran importancia por la presencia del recurso hídrico con que cuenta.

No se puede realizar la validación del modelo debido a la falta de datos en la cuenca de aguas abajo (Capitanejo), ya que cuenta con 5 años consecutivos de esta información y es utilizado 2 años como calentamiento del programa reduciendo la información y haciendo que se desvíe del objetivo, que es dar realismo al modelo, por lo tanto, se debe contar con información más robusta para darle confirmación a dicha caracterización de cambio climático en la cuenca alta del Rio Chicamocha.

La falta de datos confiables y la carencia de estudios hacen que el proceso de planificación territorial de la Corporación Autónoma de Boyacá, se vean inciertos y atados a las necesidades del crecimiento poblacional y económico del departamento, pudiendo arriesgar la disponibilidad del recurso en el futuro.

11.BIBLIOGRAFIA

Acerca de IPCC. (s. f.). Recuperado 28 de mayo de 2019, de <https://www.ipcc.ch/about/>

Andrade F., M. F., y Blacutt B., L. A. (2010). EVALUACIÓN DEL MODELO

CLIMÁTICO REGIONAL PRECIS PARA EL ÁREA DE BOLIVIA:

COMPARACIÓN CON DATOS DE SUPERFICIE. *Revista Boliviana de Física*,
17(17), 1-12.

Asamblea Constituyente. *Constitución política de Colombia*,1991, Capítulo 3, artículo 79.

Barros, V. (2006). *Cambio climático global*. Libros del Zorzal.

Berestovoy, V. (2018). Balance hídrico de la cuenca Mbói Caé asociado a El Niño:

oscilación del Sur mediante el sistema Hydro-BID. *Revista Científica Estudios e Investigaciones*, 12. <https://doi.org/10.26885/rcei.foro.2017.12>

Cabrera, J. (s. f.-a). *Calibración de Modelos Hidrológicos*. 7.

C. A. R. de C., Humanas, U. N. de C.-F. de C., y Pabón Caicedo, J. D. (2011). *El cambio climático en el territorio de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca*.

Recuperado de <http://sie.car.gov.co:80/handle/20.500.11786/33708>

Recuperado de <http://sie.car.gov.co:80/handle/20.500.11786/33708>

Colombia. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO

TERRITORIAL, Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

Bogotá, D.C. Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial,
2010. 124 p

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Código Nacional de Recursos

Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente – Anotado / comps.:

Atuesta Cepeda, Constanza; Burgos Navarro, Manuel Santiago; García Pachón,

María del Pilar; Montes Cortés, Carolina; Negrete Montes, Rodrigo Elias; Rojas

Mejía, Bibiana Bogotá, D.C.: Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo

- Sostenible, 2014 244 p. Artículo 80
- Congreso de Colombia. (15 julio 1994) Ley Orgánica del Plan de Desarrollo [Ley 152 de 1994]
- Congreso de Colombia. (22 diciembre 1992) LEY 99 DE 1993 [Ley 99 de 1993], Artículo 33
- Congreso de Colombia. (24 julio 1997) LEY 388 DE 1993 [Ley 388 de 1993]
- Congreso de Colombia. (21 septiembre 2000) LEY 614 DE 2000 [Ley 614 de 1993]
- Congreso de Colombia. (6 marzo 2014) Ley de Transparencia y del Derecho de Acceso a la Información Pública Nacional [Ley 1712 2004]
- Congreso de Colombia. (16 junio 2011) Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014 [Ley 1450 de 2011]
- Congreso de Colombia. (junio 2011) La Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial [Ley 1454 de 2011] Artículo 5.
- CORPOBOYACA, Universidad Nacional de Colombia, y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (2006a). *PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO AMBIENTAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO CHICAMOCHA. I*, 669.
- Gaviria Muñoz. (s. f.). “Si Colombia no se adapta al cambio climático perderá \$3,8 billones anuales hasta el 2100”: Simón Gaviria Muñoz. Recuperado 14 de abril de 2019, de [https://www.dnp.gov.co/Paginas/%E2%80%9CSi-Colombia-no-se-adapta-al-cambio-clim%C3%A1tico-perder%C3%A1--\\$3,8-billones--anuales--hasta-el-2100%E2%80%9D-Sim%C3%B3n-Gaviria-Mu%C3%B1oz.aspx](https://www.dnp.gov.co/Paginas/%E2%80%9CSi-Colombia-no-se-adapta-al-cambio-clim%C3%A1tico-perder%C3%A1--$3,8-billones--anuales--hasta-el-2100%E2%80%9D-Sim%C3%B3n-Gaviria-Mu%C3%B1oz.aspx)
- Ibrahim Suliman Hanaish, Kamarulzaman Ibrahim, y Abdul Aziz Jemain. (2011). *Stochastic Modeling of Rainfall in Peninsular Malaysia Using Bartlett Lewis Rectangular Pulses Models. 2011*. Recuperado de <https://www.hindawi.com/journals/mse/2011/253735/citations/>

- Jaramillo-Robledo, A., y Chaves-Córdoba, B. (2000). *DISTRIBUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN EN COLOMBIA ANALIZADA MEDIANTE CONGLOMERACIÓN ESTADÍSTICA*. 12.
- Law, A. M., y Kelton, W. D. (1991). *Simulation modeling and analysis* (2nd ed). New York: McGraw-Hill.
- Martin Vide Javier. (1991). *Fundamentos de Climatología Analítica*. Madrid; España: Síntesis.
- Martínez Pélaez, G., Gómez Ivan, Cárdenas Miguel, y Ordoñez Napoleón (Eds.). (2005). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Boyacá. T. I: ...* (Vols. 1–III). Bogotá: Instituto Geografico Agustin Codazzi.
- Mayorga Ruth, Hurtado Gonzalo, y Benavides Henry. (2011). *EVIDENCIAS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA CON BASE EN INFORMACIÓN ESTADÍSTICA*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Evidencias+de+Cambio+Clim%C3%A1tico+en+Colombia+con+base+en+informaci%C3%B3n+estad%C3%ADstica.pdf/1170efb4-65f7-4a12-8903-b3614351423f>
- Meteorología Colombiana.pdf*. (2001). Recuperado de http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/geociencias/revista_meteorologia_colombiana/numero04/04_05.pdf
- Ministerio del Interior y de Justicia de la Republica de Colombia. (2 mayo 2007) *Decreto 1480 de 2007*.
- Montealegre Bocanegra José Edgar, y Pabón Caicedo José Daniel. (2000). *Meteorología Colombiana, La variabilidad climática interanual asociada al ciclo El niño-La niña oscilacion del sur y su efecto en el patron pluviometrico del Colombia*. 2. Recuperado de

https://www.researchgate.net/profile/Jose_Daniel_Pabon_Caicedo/publication/281605886_La_variabilidad_climatica_interanual_asociada_al_ciclo_El_Nino-La_Nina-Oscilacion_del_Sur_y_su_efecto_en_el_patron_pluviometrico_de_Colombia/links/597259a60f7e9b4016943e8e/La-variabilidad-climatica-interanual-asociada-al-ciclo-El-Nino-La-Nina-Oscilacion-del-Sur-y-su-efecto-en-el-patron-pluviometrico-de-Colombia.pdf

Motavalli Jim (compilador). (2004). *El Cambio Climático, crónicas desde las zonas de*

Rincón, L. N. G., y Camargo, C. A. C. (2017). *Effect of Climate Change on Rainfall in the Upper Basin of Chicamocha River in the Period of 1980-2012*. 10.

Presidente de la República de Colombia. (13 octubre 1981) *Decreto 2857 de 1981*.

Presidente de la República de Colombia. (6 agosto 2002) *Decreto 1729 de 2002*. DO: 44.893.

Presidente de la República de Colombia. (2 agosto 2012) *Decreto 1640 de 2012*. DO: 48.510

Presidente de la República de Colombia. (29 diciembre 2017) *Decreto 2245 de 2017*.

Presidente de la República de Colombia. (26 mayo 2015) *Decreto 1076 de 2015*. DO: 49523

Roth, Günter D. (1979). *Meteorología Una Guía Práctica Para El Excursionista, El Agricultor Y El Navegante*. Barcelona: Omega.

Santos, G., Faustino, J., y Quezada, R. (2017). *Caracterización y modelado hidrometeorológico en la cuenca del río Atulapa, Guatemala*. 17.

Triviño Pérez, A., y Ortiz Rojas, S. (2004). Metodología para la modelación distribuida de la escorrentía superficial y la delimitación de zonas inundables en ramblas y ríos-rambla mediterráneos. *Investigaciones Geográficas*, (35), 67-83.

<https://doi.org/10.14198/INGEO2004.35.08>

Valencia-Duarte, J., Ortiz, L. N. T., y Ríos, O. V. (2012). Dinámica de la vegetación en un enclave semiárido del río Chicamocha, Colombia. *Biota Colombiana*, 13(2).

<https://doi.org/10.21068/bc.v13i2.262>

Zinck, J. A. (2012). *Geo pedología: elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgos naturales*. Enschede: ITC.